

Comportamiento a fatiga de uniones a solape simple con adhesivo epoxi de acero y acero prepintado^(*)

R. Bermejo*, J. Oñoro* y R. García-Ledesma*

Resumen

Las propiedades mecánicas de las uniones adhesivas no solo dependen de la naturaleza y propiedades de los adhesivos; hay muchos otros parámetros que influyen directamente en el comportamiento de las uniones adhesivas. Algunos de los más significativos son: el acabado superficial de los materiales, área y espesor de la capa adhesiva, un diseño adecuado, secuencia de aplicación, propiedades químicas de la superficie y preparación de los sustratos antes de aplicar el adhesivo. La resistencia mecánica de las uniones adhesivas está íntimamente relacionada con el proceso de rotura, directamente dependiente del mecanismo cohesión-adhesión. El objeto de este trabajo es analizar la influencia de dos acabados superficiales diferentes, sobre el comportamiento a fatiga de uniones con adhesivo epoxi. Los resultados muestran que la compatibilidad química entre el adhesivo y la capa prepintada mejora la adhesión de las uniones y la resistencia mecánica frente a cargas estáticas y dinámicas. Se ha obtenido el límite de fatiga para las uniones de ambas superficies.

Palabras clave

Unión adhesiva; Epoxi; Acabado superficial; Fatiga.

Fatigue behaviour of single overlap joints on steel and pre-painting steel with epoxy adhesive

Abstract

The mechanical properties of adhesive joints depend not only on the nature and properties of the adhesives; there are many parameters which influence the behaviour of the adhesive joints. Some of more significant parameters are: the surface conditions of materials, area and thickness of adhesive layer, compatibility of the design, applying sequence, chemical properties of surface and the surface treatments of substrates prior to be bonded. The mechanical resistance of adhesive joints is interrelated to the fracture process depended on cohesion-adhesion mechanism. The aim of this paper is analyse the influence of two different surfaces on the fatigue behaviour of epoxy adhesive joints. The results show that chemical compatibility of adhesive and paint improve adhesion of joints and the mechanical resistance against static and dynamic loads. The fatigue limited has been obtained for joints with both surfaces.

Keywords

Adhesive joint; Epoxy; Surface Finís; Fatigue.

1. INTRODUCCIÓN

La ciencia y la tecnología de la adhesión, debido al vertiginoso desarrollo de nuevas formulaciones de adhesivos y mejora de las condiciones de utilización, está en pleno crecimiento como método de unión de materiales, habiéndose introducido en aplicaciones hasta ahora reservadas a otros sistemas de unión como la soldadura o las uniones mecánicas. El desarrollo de las uniones adhesivas se debe a las ventajas que presenta con respecto a otros sistemas de unión. Un adhesivo distribuye, de forma más

uniforme y homogénea, las tensiones que las uniones remachadas y atornilladas, evitando áreas de alta concentración de tensiones, como aparecen en los taladros requeridos en dichas uniones (Fig. 1) ^[1 y 2]. Las uniones mecánicas de componentes realizan la unión por medio de puntos localizados, mientras que los adhesivos forman uniones continuas, cualidad que permite que las uniones adhesivas sean más rígidas y, como consecuencia, puedan soportar cargas superiores (Fig. 2) ^[3 y 4]. Las uniones adhesivas no producen distorsión del sustrato al no ser necesario el calentamiento o la deformación de

(·) Trabajo recibido el día 28 de mayo de 2007 y aceptado en su forma final el día 17 de abril de 2008.

* Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales. Universidad Politécnica de Madrid, ETSI Industriales. c/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid.

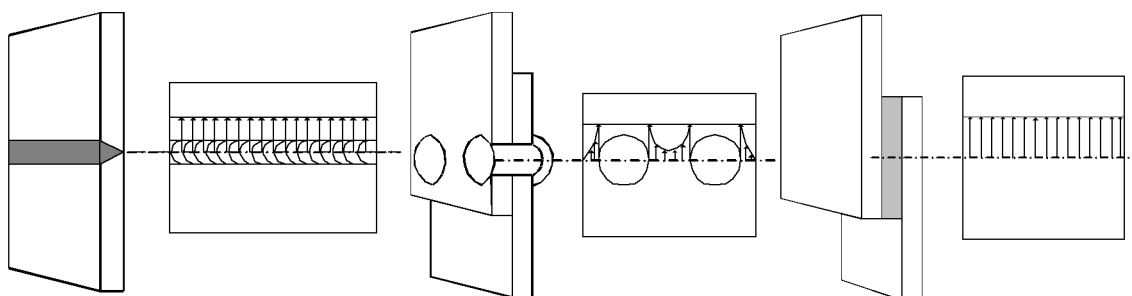


Figura 1. Distribución de la tensión en uniones soldadas, remachadas y adhesivas.

Figure 1. Stress distribution on welded, mechanical and adhesive joints.

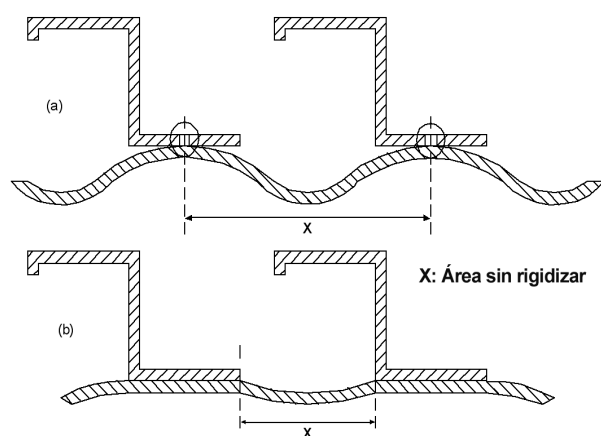


Figura 2. Efecto rigidizador entre uniones remachadas (a) y uniones adhesivas (b).

Figure 2. Stiffness effect between mechanical joints (a) and adhesive bonded joints (b).

las piezas cuando se someten a un calentamiento elevado y muy localizado, como en el caso de la soldadura, o a esfuerzos mecánicos, en el caso de montajes remachados. Al no requerir importantes aportes de calor, como la soldadura, no produce modificaciones microestructurales indeseables, como sucede en la zona fundida o en la zona afectada térmicamente de las uniones soldadas, ni deteriora los recubrimientos protectores de metales de bajo punto de fusión o de naturaleza orgánica. Los adhesivos permiten la unión de distintos materiales de forma económica. También, pueden actuar como selladores consiguiendo, de esta forma, uniones mecánicas estancas. Otra ventaja de la unión adhesiva es que se comporta como un aislamiento, evitando la entrada de agentes corrosivos (humedad, aire, etc.)^[1 y 5]. De esta manera, se pueden re-

alizar uniones entre metales con diferentes propiedades electroquímicas. El empleo de las uniones adhesivas puede suponer una disminución de los costes de manipulación y almacenamiento, así como una aceleración de los procesos de ensamblaje y, como consecuencia, un aumento de los procesos de producción, debido todo ello a la reducción del número de componentes tales como los tornillos, remaches, abrazaderas, etc.^[3 y 6]. Los mecanismos de adhesión entre diversos materiales son complejos. En general, cada unión adhesiva solo puede explicarse considerando la actuación conjunta de varios mecanismos de adhesión^[7]. No existen adhesivos universales para un determinado material o aplicación, por lo que cada pareja sustrato-adhesivo requiere un particular estudio de cómo se realiza la unión y el comportamiento obtenido puede variar, significativamente, de uno a otro caso^[1].

La chapa fina de acero prepintado tiene diversas aplicaciones: automoción, construcción, línea blanca y marrón, etc. La unión de estos materiales se realiza habitualmente mediante remachado aunque, para determinadas aplicaciones se ha sustituido, ya sea total o parcialmente (uniones híbridas), por uniones adhesivas, que permiten, en muchos casos, aunar las ventajas de ambos sistemas de unión^[8]. La naturaleza química de la pintura y el tipo de adhesivo tienen un efecto fundamental en las propiedades de la unión, debido principalmente a la compatibilidad química y electroquímica de los dos materiales responsables de la unión^[9]. Es, por tanto, necesario identificar los adhesivos más idóneos para cada tipo de pintura o recubrimiento utilizado.

Los adhesivos epoxi son, generalmente, adhesivos bicomponentes constituidos por una resina y un activador promotor de la polimerización (curado)^[3 y 9]. Deben ser mezclados inmediatamente an-

tes de ser aplicados porque poseen un tiempo de manipulación muy limitado. Una vez premezclados los componentes del adhesivo, la polimerización comienza a producirse, aunque no es instantánea, por lo que los sustratos unidos se deben mantener juntos en la posición requerida, hasta alcanzar la unión una resistencia suficiente que permita su manipulación. En la actualidad, existen adhesivos epoxi monocomponentes, con un agente endurecedor que se libera, únicamente, por reacción a alta temperatura. Los adhesivos epoxi ofrecen ventajas sobre las uniones remachadas metal-metal; la principal ventaja es económica, ya que con las uniones adhesivas se consigue reducir el coste de mano de obra. También, como en el resto de adhesivos, las uniones presentan una distribución de tensiones más uniforme sobre la superficie, produciendo una unión más rígida y resistente y más resistente a la fatiga. Asimismo, permite utilizar recubrimientos metálicos delgados sin que aparezcan distorsiones locales, como sucede en las uniones remachadas. También hacen posible la fabricación de contornos uniformes, importantes en los aeroplanos de alta velocidad^[9]. Y, por último, permiten unir metales diferentes sin que existan problemas de corrosión. Los adhesivos epoxi ofrecen otras propiedades importantes ya que generan uniones de elevada rigidez, poseen gran capacidad de relleno de holgura, presentan una alta resistencia a cizalla y a tracción, buena resistencia química, a la humedad, a solventes y a temperaturas de hasta 180 °C. Pueden ser mecanizados fácilmente. Aunque son dieléctricos y aislantes térmicos, pueden ser modificados para ser conductores de la electricidad y del calor^[5 y 9].

La rotura por fatiga es una forma de fallo por fractura de los materiales, que se produce cuando estos están sometidos a la acción de cargas o vibraciones fluctuantes^[10]. Las uniones y estructuras sometidas a tensiones variables hacen que el fallo se produzca a niveles de carga por debajo del límite de resistencia estática de los materiales. El fallo por fatiga ocurre súbitamente, sin deformación previa. La fatiga se produce por una acumulación de daño en el material que va debilitándolo siendo, en la mayoría de los casos, un proceso de iniciación y propagación de grietas. El tiempo que el material permanece en servicio antes de producirse el fallo está determinado por el nivel de tensiones y la frecuencia de los ciclos de carga. El análisis se realiza mediante la obtención de las curvas de tensión frente al número de ciclos hasta el fallo del componente (curvas SN) o curvas de Wöhler, que permitirán realizar una estimación de la resistencia a la fatiga de un determinado material o estructura. Los ensayos de fa-

tiga realizados mediante ciclos predeterminados de carga sinusoidales, de amplitud y frecuencia constantes, permiten caracterizar el comportamiento a la fatiga por el número de ciclos hasta la rotura, siendo el límite de fatiga el valor al que tiende la tensión cuando el número de ciclos es muy grande. En algunos materiales, la fatiga no tiende a un valor límite sino que decrece de forma constante a medida que aumenta el número de ciclos. Para estas situaciones, se debe definir la resistencia a la fatiga (o límite de resistencia) por la tensión para un número de ciclos de rotura predeterminado^[11].

En este trabajo se estudia el comportamiento mecánico de uniones realizadas con adhesivo epoxi en chapas de aceros al carbono con dos estados superficiales diferentes: acero laminado acabado en blanco (decapado químicamente para eliminar la capa de óxido formada durante la laminación) y acero laminado con recubrimiento orgánico poliéster-epoxi. Las uniones han sido realizadas a solape simple y se han ensayado a cizalladura con fuerza creciente hasta rotura y a cargas sinusoidales en condiciones de fatiga a distintos niveles de tensión. Se ha determinado, para ambos acabados superficiales, el límite de fatiga.

2. MATERIALES Y TÉCNICA EXPERIMENTAL

Las uniones se han realizado sobre dos materiales diferentes: chapa de acero al carbono laminado y decapado, acero blanco de 100 x 25 x 1,5 mm, y chapa de acero al carbono pintado con un recubrimiento orgánico poliéster-epoxi (proporción 1:1), de 100 x 25 x 0,8 mm, con un espesor de recubrimiento de 0,03 mm de color gris según EU 10169^[12].

La superficie de las muestras se limpió de restos de grasa y suciedad con papel industrial impregnado en acetona, dejándolas secar al aire antes de aplicar el adhesivo. Este sistema de limpieza ha resultado ser rápido, económico y no ha producido ninguna alteración significativa en las características de las superficies tratadas. El adhesivo utilizado ha sido un epoxi bicomponente Loctite Hysol 9464. El adhesivo se ha aplicado sobre la superficie de uno de los sustratos, inmediatamente antes de realizar la unión. El tiempo de curado ha sido de tres días. Durante este tiempo se ha mantenido una presión constante sobre las uniones.

Se han realizado ensayos de cizalla por tracción en probetas a solape simple hasta rotura para determinar los valores de resistencia de las uniones. Estos ensayos se han realizado según lo recogido en la nor-

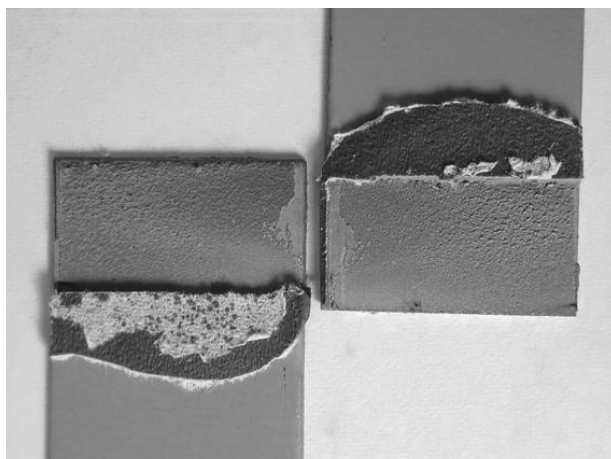


Figura 3. Unión epoxi con un 96 % de rotura cohesiva.

Figure 3. Epoxy bonded joint with 96 % of cohesive broken.

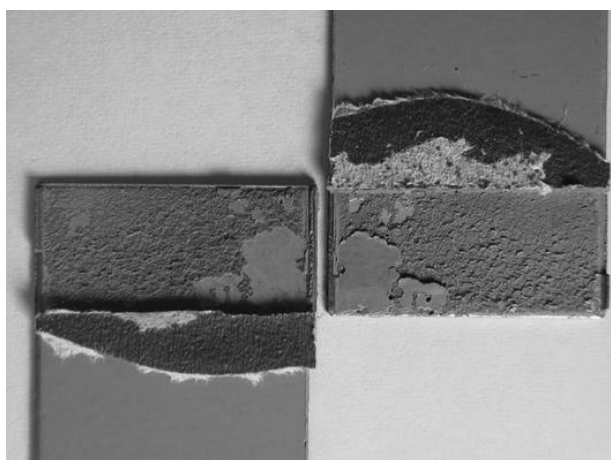


Figura 4. Unión epoxi con un 85 % de rotura cohesiva.

Figure 4. Epoxy bonded joint with 85 % of cohesive broken.

ma UNE-EN 1465 [13]. Los ensayos se han realizado en una máquina universal de ensayos electromecánica INSTRON 1362. Algunas de las probetas ensayadas se muestran en las figuras 3 y 4, donde puede verse que no han sufrido una deformación macroscópica apreciable.

Los ensayos de fatiga se han realizado sobre uniones a solape simple, similares a las utilizadas en los ensayos de cizalladura, según lo dispuesto en la norma UNE-EN ISO 9664 [14]. Para estos ensayos se ha utilizado una máquina universal de ensayos hidráulica MTS 810. Se han llevado a cabo ensayos de fatiga a diferentes valores de carga, determinándose el número de ciclos hasta rotura de cada muestra ensayada. Los ensayos de fatiga han consistido en la aplicación de un ciclo sinusoidal tensión-tensión con una relación de tensiones: $R = 0,1$. La tensión máxima, en todos los ensayos, ha estado comprendida entre el 20 y el 70 % de la tensión de rotura obtenida en los ensayos de cizalladura. La frecuencia de los ensayos ha sido de 10Hz. Los ensayos se han realizado a temperatura ambiente (aproximadamente 22 °C). El número máximo de ciclos aplicado ha sido de 10^6 . Se han ensayado cuatro probetas en cada nivel de tensión analizado.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los ensayos de cizalla por tracción se han recogido en la tabla I. En ella, puede verse como los ensayos sobre muestras prepintadas han alcanzado valores muy superiores a los conseguidos en las uniones sobre acero blanco. Esto se ha debido a que, en el acero blanco, el fallo de la unión ha sido predominantemente adhesivo mientras que, en las muestras de acero prepintado, la rotura ha sido, fundamentalmente, cohesiva. El fallo adhesivo se ha debido a que no se han conseguido las mejo-

Tabla I. Valores medios del ensayo de cizalladura a solape simple

Table I. Average values of single lap shear tests

	ACERO BLANCO	ACERO PREPINTADO
TENSIÓN DE ROTURA (MPa)	13,6	22,0
ESPEJOR CAPA ADHESIVA (mm)	0,18	0,19
SOLAPE (mm)	13,0	12,9
CURADO(días)	3	3
TIPO DE ROTURA	Adhesiva	Cohesiva

res condiciones de adhesión para el acero blanco y el adhesivo está trabajando por debajo de sus posibilidades. El sistema de adhesión utilizado no es, por tanto, el más adecuado para este tipo de preparación superficial. La elección de una adecuada preparación superficial es fundamental para conseguir las mejores condiciones de adhesión^[1 y 15]; la modificación de la superficie mediante un lijado para aumentar la rugosidad superficial podría haber supuesto una mejora en la adhesión, pero no se ha realizado ya que el objetivo del trabajo era el estudio del comportamiento sobre la superficie en estado de recepción, evitando los encarecimientos inherentes a cualquier proceso adicional de preparación superficial. El espesor de adhesivo utilizado en todas las uniones ha sido pequeño y muy similar (Tabla I) para que esta variable no afectara a los resultados de los ensayos mecánicos^[16].

Los resultados de los ensayos de fatiga se han recogidos en la figura 5. Como se puede observar, conforme disminuye la tensión de rotura aumenta el número de ciclos de carga hasta llegar a rotura, como es característico en las curvas SN. El número de ciclos para rotura aumenta considerablemente cuando la tensión máxima desciende por debajo del 50 % de la tensión de rotura a cizalladura. En el diagrama, también se puede ver el valor de la tensión máxima que es capaz de soportar la unión sin fallar después de 10^6 ciclos de carga, según se recoge en la norma UNE-EN ISO 9664^[14]. En la figura 5 se muestra una comparación de los resultados que se han obtenido con las probetas de acero blanco y con recubrimiento de poliéster-epoxi en el ensayo de fatiga. Ambos tipos de probetas presentan, en general, una buena resistencia a fatiga. Aunque se

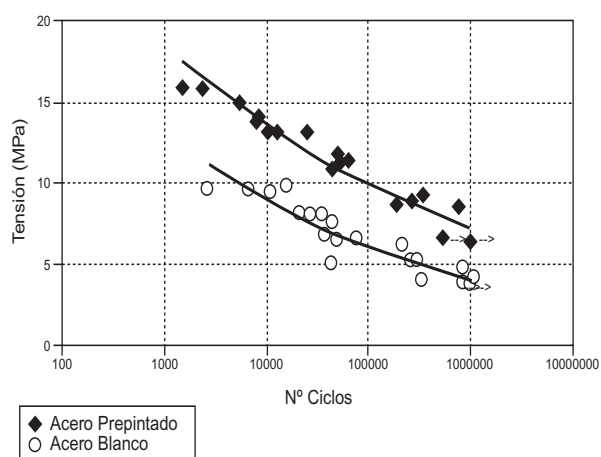


Figura 5. Resultados de los ensayos de fatiga.

Figure 5. Fatigue tests results.

aprecia un comportamiento paralelo para ambos materiales, son las probetas de acero con recubrimiento de poliéster-epoxi las que poseen mejor comportamiento a fatiga y mayor porcentaje de rotura cohesiva. El límite de resistencia obtenido para la tensión máxima sin que se haya producido la rotura ha sido: 3,8 MPa para el acero blanco y 6,6 MPa para el acero recubierto con pintura poliéster-epoxi. El valor límite representa, aproximadamente, el 28 % de la tensión de rotura en los ensayos de cizalladura en el acero blanco y el 30 % en los aceros prepintados con poliéster-epoxi. Estos valores porcentuales y la forma relativamente similar de las curvas SN obtenidas para ambas superficies, indican que las condiciones de fallo en fatiga están directamente relacionadas con la resistencia estática del material.

Los ensayos de fatiga en uniones de acero blanco han dado lugar a fallo adhesivo, al igual que ha pasado en los ensayos de cizalladura. En cambio, en las uniones sobre acero prepintado los ensayos de fatiga han presentado fallo cohesivo, en algunos casos, de casi el 100 % de la superficie, como se puede apreciar en las figuras 3 y 4. Un análisis, mediante lupa binocular, de las zonas de las superficies con fallo aparentemente adhesivo, muestran que la rotura se ha producido en la pintura, pudiéndose identificar cómo, en muchos puntos, la superficie rota arrastra pequeñas partes metálicas. Por lo tanto, el fallo en estas zonas corresponde a una rotura del sustrato pintado, que parece tener una resistencia ligeramente superior al adhesivo, por lo que ha fallado, sólo, en aquellos puntos donde se encontraba debilitado.

Las muestras ensayadas por fatiga que no llegaron a romperse después de 10^6 ciclos de carga fueron ensayadas a cizalla por tracción y mostraron un resistencia residual muy elevada: 13,1 MPa para el acero blanco y 18,3 MPa para el acero prepintado, que corresponden a valores del 96 y 83 %, respectivamente, de los valores medios alcanzados en los ensayos a cizalla por tracción a solape simple, como se muestran en la tabla I. Igual que el resto de ensayos, la rotura en el acero blanco fue adhesiva, mientras en el acero prepintado fue mayoritariamente cohesiva. Estos resultados indican que por debajo de cierto valor de tensión el proceso de fatiga ha debilitado poco la unión original a pesar del alto número de ciclos que ha soportado en condiciones de fatiga.

En los ensayos de fatiga, el porcentaje de rotura cohesiva es mayor que el obtenido en los ensayos de cizalladura. Cuando se observa la rotura, se aprecia que el fallo por fatiga no se produce por un pro-

ceso de iniciación y crecimiento de grieta de forma estable. De hecho, el proceso de fatiga va debilitando poco a poco la unión adhesiva y provoca un fallo brusco de naturaleza inestable. Underhill^[17] explica este mecanismo como un proceso de daño irreversible de los enlaces más débiles en determinados puntos de la unión. Cuando se ha producido el deterioro de estas zonas más débiles, su área se va incrementando hasta que llega un momento en que la zona dañada es tan amplia que se produce el fallo completo de la unión. Este proceso de fallo se produce tanto en los fallos adhesivos como en los cohesivos, como puede apreciarse en la figura 5, teniendo, en ambos casos, una resistencia al fallo que presenta un desarrollo paralelo, al igual que el límite de fatiga y que está, en ambos materiales, en torno al 30 % de la tensión de rotura obtenida en los ensayos de cizalladura. En ensayos de crecimiento de grieta realizados sobre probetas preagrietadas en viga con doble voladizo (DCB), Dessureault^[18] identifica los procesos de iniciación y crecimiento de grietas en muestras unidas con adhesivo epoxi como una acumulación de microfisuras en la zona próxima al fondo de grieta que, luego, van coalesciendo para configurar la grieta principal. Lo que supone, igualmente, un proceso de daño del adhesivo en la zona de mayor concentración de tensiones que, posteriormente, conduce al fallo de la unión.

La utilización de adhesivos epoxi en la unión de chapas prepintadas con recubrimiento poliéster-epoxi ha presentado unas buenas propiedades de adhesión y una aceptable resistencia a la fatiga en uniones a solape simple. La utilización de esta técnica es una alternativa eficaz para obtener uniones con propiedades superiores a las conseguidas con uniones remachadas, habitualmente utilizadas en estos materiales para la construcción de elementos estructurales como techos y fachadas. La mejor rigidez, estanqueidad y resistencia a la corrosión que supone la utilización del adhesivo epoxi es una ventaja adicional para la aplicación de este tipo de uniones.

4. CONCLUSIONES

El estudio del comportamiento a fatiga de uniones adhesivas con resina epoxi de aceros al carbono acabados en blanco o recubiertos con pintura poliéster-epoxi ha conducido a los siguientes resultados:

— Se han obtenido las curvas SN del comportamiento a fatiga de las uniones adhesivas. Las mejores propiedades se han obtenido en las uniones

realizadas sobre acero prepintado con pintura poliéster-epoxi.

- Se ha obtenido el valor del límite de resistencia de la tensión máxima en fatiga sin rotura, después de 10^6 ciclos de carga: 3,8 MPa en el acero en blanco y 6,6 MPa para el recubrimiento de poliéster-epoxi. Los límites, para ambos casos, han estado en torno al 30 % de la resistencia obtenida en los ensayos a cizalladura a carga creciente.
- Las uniones con adhesivo epoxi sobre acero blanco han presentado un fallo adhesivo, mientras que las uniones de aceros con recubrimiento de poliéster-epoxi alcanzan las mejores propiedades con un elevado porcentaje de rotura cohesiva.
- La utilización de adhesivos epoxi en la unión de acero prepintado con pintura poliéster-epoxi, permite obtener uniones de elevadas propiedades mecánicas con buena resistencia a la fatiga.

REFERENCIAS

- [1] P. Cognard, *Adhesives and Sealants. Basic Concepts and High Tech Bonding*, Ed. Elsevier. Oxford, U.K., 2005, pp. 238, 23, 261.
- [2] Loctite, *Worldwide Desing Handbook*, Ed. Loctite, Munich, Alemania, 1995, pp. 147-163.
- [3] M. Madrid, *Tecnología de la Adhesión*, Ed. Loctite, Madrid, España, 2002 pp. 18-20, 158-168 y 129-139.
- [4] B. Duncan, S. Abbott, R. Court, R. Roberts y D. Leatherdale, *A Review of Adhesive Bonding Assembly Processes and Measurement Methods*, Ed. National Physical Laboratory Teddington, Middlesex, UK, 2003, pp. 25-35.
- [5] C.A. Dostal, *Adhesives and Sealants (Engineered Materials Handbook)*, Ed. CRC Press, New York, 1990.
- [6] A.V. Pocins, *Adhesion and Adhesives Technology*, Ed. Hanser-Gardner, Cincinnati, 1997.
- [7] J.M. Martín-Martínez, *Adhesión y uniones adhesivas*, Ed. Universidad de Alicante, 1998, p. 31.
- [8] S. Gómez et al, *Int. J. Adhes. Adhesives* 27 (2007) 263-267.
- [9] E.M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants* Ed. McGraw Hill, New York, 1999. pp. 26, 61 y 361.
- [10] R. Houwink y G. Salomón, *Adherencia y adhesivos*, Ed. Urmo, Tomo I, Bilbao, 1978, pp. 127-130.
- [11] H. Hadavinia et al, *Int. J. Adhes. Adhesives* 23 (2003) 449-461.

- [12] EU 10169, *Productos planos de acero recubiertos en continuo de materiales orgánicos (precalentados)*, 2000.
- [13] UNE-EN 1465:1996, *Adhesivos. Determinación de la resistencia a la cizalladura por tracción de juntas pegadas de sustratos rígidos*, 1996.
- [14] UNE-EN ISO 9664:1996, *Adhesivos. Métodos de ensayo para resistencia a la fatiga por esfuerzo de cizalla de adhesivos estructurales*, 1996.
- [15] J. Durán, J.M. Amo, C. Durán, J. Oñoro, R. García-Ledesma, *Rev. Metal. Madrid* Vol. Extr. (2005) 345-350.
- [16] R. García-Ledesma, J. Oñoro, J.M. Amo, M.C. Durán y J. Durán, *Rev. Metal. Madrid* 41 (2005) 60-65.
- [17] P.R. Underhill y D.L. Duquesnay, *Int. J. Adhes. Adhesives* 26 (2006) 62-66.
- [18] M. Dessureault y J. K. Spelt, *Int. J. Adhes. Adhesives* 17 (1997) 183-195.